

渗糖方式对加应子果脯营养、香气及果肉结构的影响

沈雪玉¹, 陈日辉¹, 林钰婷¹, 陈重光¹, 黄苇^{1*}

1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642

摘要: 加应子果脯是广式蜜饯的代表性产品, 糖渍是加应子制作过程中重要的环节。传统糖渍工艺主要利用高浓度糖液浸渍产生的渗透压促使果蔬组织脱水, 但存在渗糖耗时长、生产效率低、营养及风味损失较严重等问题。为解决以上问题, 基于电子鼻、扫描电镜等检测方法及模糊数学感官评价法, 以传统热渗糖为对照, 对比分析真空渗糖、微波渗糖、超声波渗糖方式对加应子渗糖速率、营养成分、香气品质、感官品质及果肉微观结构的影响。结果表明: 与对照相比, 三种新渗糖方式均显著提高了渗糖速率, 以微波渗糖最高, 真空渗糖次之; 但在营养素及特征香味物质保留方面, 真空渗糖产品的总酚、类黄酮、花色苷等抗氧化成分含量, 醇类、醛酮香气成分响应值均显著优于对照 ($P>0.05$), 而微波渗糖则显著劣于对照 ($P>0.05$), 超声波与对照差异不显著 ($P>0.05$)。四种渗糖方式中, 真空渗糖制备的加应子果脯营养、感官及香气品质均为最佳, 总酚、类黄酮和花色苷含量分别达到 2.69 GAE mg/g、5.44 RE mg/g、4.45 mg/100g; DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除能力、铁离子还原能力分别达到 14.23 mmol TE/g、128.54 mmol TE/g、35.61 mmol Fe²⁺/g; 感官评分为 85.73 分, 电子鼻传感器 W2S(对醇类及醛酮类灵敏)的响应值为 29.65; 渗糖速率排序第二位, 干燥终点的总糖含量达 63.05%; 真空渗糖对果肉细胞结构的破坏程度低, 能保持较高的营养, 是制备高品质三华李加应子的优选渗糖方法。微波渗糖速率最高, 干燥终点的总糖含量达 65.79%, 但果脯营养与香味损失最大, 果肉细胞结构破坏严重。超声波渗糖速率略高于对照, 营养及感官品质接近, 果肉细胞结构差异不明显。本研究结果为果脯加工过程中渗糖工艺选择提供了有益的参考。

关键词 三华李; 加应子果脯; 渗糖方式; 果肉微观结构; 营养

中图分类号 TS255.3

文献标识码 A

Effects of Sugar Permeability Methods on Nutrition, Aroma and Structure of Candied Prunes

SHEN Xueyu¹, CHEN Rihui¹, LIN Yuting¹, CHEN Chongguang¹, HUANG Wei^{1*}

1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: Jiayingzi was a representative product of Cantonese candied fruit, and sugaring was an important part of the processing of jiayingzi. Traditional sugar process mainly uses osmotic pressure caused by high concentration sugar solution to dehydrate fruit and vegetable tissues. However, it was limited by long sugar penetration, low production efficiency and serious loss of nutrition and flavor. To solve the above problems, detection methods such as electronic nose, scanning electron microscope and fuzzy mathematical sensory evaluation method were introduced. The effects of vacuum, microwave and ultrasonic technologies on sugar infiltration rate, nutrient composition, aroma quality, sensory quality and flesh microstructure of jiayingzi were compared with traditional hot soak. The results showed that compared with the control, three new technology significantly increased the sugar infiltration rate, microwave was the highest, followed by vacuum. However, in terms of retention of nutrients and characteristic aroma substances, the contents of total phenols, flavonoids, anthocyanins and the response values of alcohols, aldehydes and ketones in vacuum were significantly better than the control ($P<0.05$), while microwave was significantly inferior to the control ($P<0.05$), and ultrasound was not significantly different from the control ($P>0.05$). Among the four sugar permeability methods, the nutritional, sensory and aroma quality of the Jiayingzi by vacuum were the best, and the content of total phenols, flavonoids and anthocyanins were the highest, reaching 2.69 GAE mg/g, 5.44

收稿日期 2021-12-01; 修回日期 2021-12-02

基金项目 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目 (No. 2021KJ117); 广东传统果品智能化绿色加工关键技术及配套装备研发与产业化 (No. 202B020225006)

作者简介 沈雪玉(1997—), 女, 硕士研究生; 研究方向: 食品加工与贮藏。通信作者(Corresponding author): 黄 苇(HUANG Wei), E-mail: weihscu@163.com。

RE mg/g, 4.45 mg/100g. The AA_{DPPH} , AA_{ABTS} and iron ion reduction capacity reached 14.23 mmol TE/g, 128.54 mmol TE/g, 35.61 mmol Fe^{2+} /g. The sensory score was 85.73 points, electronic nose sensor W2S (sensitive to alcohols and aldehydes and ketones) with a response value of 29.65. The sugar infiltration rate ranked second, the total sugar content at the drying end point reached 63.05%. Vacuum sugar infiltration has a low degree of damage to the pulp cell structure, which maintained high nutrition. It was the preferred sugar infiltration method for preparing high-quality Sanhua plums. The microwave sugar infiltration rate was the highest, the total sugar content at the end of drying reaches 65.79%, but the nutrient and flavor were lost the most, and the pulp cell structure was seriously damaged. The ultrasonic sugar infiltration rate was slightly higher than that of the control, the nutritional and sensory qualities were similar, and the difference in the pulp cell structure was not obvious. The results provide a useful reference for the selection of sugar penetration technology in the processing of preserved fruit.

Keywords: Sanhua plum; candied prunes; sugar permeability methods; pulp microstructure; nutrition

三华李 (*Prunus salicina* Lindl. cv. sanhua) 为蔷薇科 (Rosaceae Family) 李属 (*Prunus*) 植物, 肉厚核小, 肉质爽脆, 果肉中含有丰富的花色苷使其呈现紫红色。三华李除富含矿质元素, 维生素, 有机酸外, 花色苷、酚酸、黄酮等活性成分较其他李果更为丰富, 具有良好的抗氧化活性, 是广式蜜饯果脯的主要原料之一^[1-2]。加应子是广式蜜饯的代表性产品, 以李果的果坯为原料, 经糖渍调味、干燥而成^[3]。糖渍是加应子制作重要工艺, 是形成加应子风味、外观、口感的最主要环节。热浸泡渗糖法是传统的渗糖工艺, 通常将糖溶解煮至 80~90 °C, 将李果浸泡于糖液中, 定时提高糖液浓度, 大约经过 7~8 d 渗糖平衡后, 再进行干燥, 使成品中总糖含量达到 60% 以上^[4], 以达到产品要求的外观饱满度、口感及防腐要求。传统糖渍工艺主要利用高浓度糖液产生的渗透压使物料中的水分转移到溶液, 达到脱除果蔬组织中部分水分的目的, 但存在渗糖耗时长、生产效率低、产品的营养及原果风味损失较严重等问题^[5]。

崔书成等^[6]研究发现在低温条件下, 将真空, 超声波, 自然三种渗糖工艺结合, 加应子渗糖速度快且不反砂。冯媛媛等^[7]研究发现欧李在 240 W 微波功率下渗糖 20 min, 能有效提高欧李的渗糖效果。孙丽婷等^[8]研究发现超声波渗糖技术有利于提高红宝石李果脯的渗糖速率及滋味品质。目前, 有关果脯糖渍工艺的研究大都通过渗糖速率及感官评价来评定工艺的优劣, 但采用电子鼻、电镜等先进技术, 从营养、香味及果肉组织结构来全面系统客观评价果脯渗糖速率、营养及风味等变化, 并揭示其可能机理的研究鲜见报道。前人在优化果脯糖渍工艺方面, 研究了真空、微波、超声波等技术制备话李^[9]、脆红李^[10]、双华李^[11]和龙滩珍珠李^[12]果脯, 三华李因富含花色苷, 较其他品种李果颜色美观, 抗氧化活性强, 加工中损失严重, 专门针对三华李加应子果脯糖渍工艺的研究未见报道。

本文以三华李乳酸发酵果坯为原料, 探讨传统热渗糖、真空渗糖、微波渗糖、超声波渗糖等不同渗糖技术对三华李加应子渗糖速率、营养成分、香气及感官品质的影响, 并结合扫描电镜观察三华李果肉微观结构, 揭示渗糖方式对三华李加应子品质影响的内在原因, 以为高品质三华李加应子的生产提供优化工艺。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 材料与试剂

乳酸发酵三华李果坯^[13]: 新鲜三华李果, 洗净沥干置于发酵罐, 添加乳酸菌室温密封发酵为果坯; 蔗糖 (食品级), 市售; 水溶性维生素 E (Trolox)、1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH)、2, 2'-联氨-双 (3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) 二胺盐 (ABTS)、三吡啶基三嗪 (TPTZ) (均为分析纯), 美国 Sigma-Aldrich 公司; 无水乙醇、硫酸、芦丁、福林酚等其他试剂均为国产分析纯。

1.1.2 仪器设备 EVO MA 15 钨灯丝扫描式电子显微镜 (德国卡尔蔡司公司); PEN3 便携式电子鼻 (德国 Airsense 公司); TU-1800 紫外可见分光光度计 (北京普析通用仪器有限责任公司); KQ-500DE 超声波清洗器 (昆山市超声仪器有限公司); DHG-9240A 电热鼓风干燥箱 (上海一恒科学仪器有限

公司)；SHZ-D(III)循环水式真空泵(巩义市予华仪器有限公司)；Galanz 微波炉(广东格兰仕微波炉电器有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 工艺流程

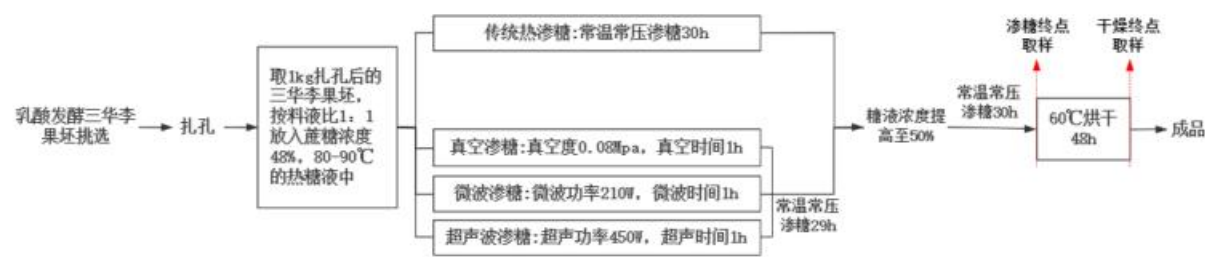


图 1 三华李加应子果脯加工工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of Candied Sanhua Plum

1.2.2 总糖含量的测定 参考宋倩^[14]的方法, 采用蒽酮比色法测定总糖含量。

1.2.3 抗氧化成分含量及活性的测定

(1)总酚、总黄酮、花色苷含量的测定: 取适量加应子去核搅碎, 准确称取 5.0 g 样品加入 25 mL 含 0.8% 盐酸的 55% 乙醇溶液, 50 °C 水浴中浸提 70 min, 抽滤并收集滤液, 定容至 25 ml, 4 °C 避光储存。总酚含量参考吴晓青等^[15]的方法, 以没食子酸为标准品, 用 Folin-Ciocalteu 比色法测定。总黄酮含量参考白生文等^[16]的方法, 以芦丁为标准品, 采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法测定。花色苷含量参考雷良波等^[17]的方法, 采用 pH 示差法测定。

(2)DPPH、ABTS⁺和 FRAP 法测定抗氧化能力: DPPH 自由基清除能力测定参考 Sokolletowska 等^[18]的方法, 以 Trolox 作为抗氧化能力对照, 结果以每克样品中 Trolox 当量表示 (μmol Trolox/g)。ABTS⁺自由基清除能力测定参考何礼等^[19]的方法, 以 Trolox 作为抗氧化能力对照, 结果以每克样品中 Trolox 当量表示 (μmol Trolox/g)。FRAP 的测定参考陈浩南等^[20]的方法, Fe³⁺还原力以 FeSO₄ 标准液作为参照, 结果以达到相同吸光度所需的 Fe²⁺ 浓度表示 (mmol Fe²⁺/g)。

1.2.4 香气成分的测定 将加应子搅碎后, 取 5 g 样品, 60 °C 恒温水浴 30 min 后, 室温下平衡 20 min, 随后插入电子鼻探头吸取顶端气体, 测定香气物质。电子鼻参数: 采样间隔 1 s, 冲洗时间 120 s, 调零时间 10 s, 预采样时间 5 s, 检测时间 150 s, 载气流速、进样流速 200 mL/min。

1.2.5 感官品质模糊评价 参考崔立柱^[21]的方法, 组织 10 名专业食品评定人员, 无感官方面缺陷。在评价前, 禁烟酒及味重食物, 评价过程中禁止相互讨论, 每评价一款产品间隔 15 min 以上, 且进行清水漱口。从成品的组织形态、色泽、口感质地、酸甜度和风味五个方面对三华李加应子进行感官评分, 评分标准见表 1。

表 1 三华李加应子感官评价标准

Tab. 1 Sensory score standard of candied Sanhua prunes

评语集		评价指标			
		Evaluation indicators			
Comment set	组织形态 U ₁ Shape	色泽 U ₂ Colour	口感质地 U ₃ Texture	酸甜度 U ₄ Sweetness and sourness	风味 U ₅ Flavor
优 V ₁ Excellent	形态完整饱满, 无破 损, 渗糖均匀	色泽丰润均匀, 有光	柔软适中, 果肉厚实 富有嚼劲及弹性	酸甜适中, 甜味纯 厚, 酸味爽口愉快	富有李子原果香味及 良好发酵风味, 无异 味

良 V ₂ Good	形态较饱满，无破损，渗糖较均匀	色泽较均匀，较有光泽	果肉稍软，有弹性，嚼劲较好	酸甜基本适中，味道偏甜或酸，但不刺激	李子原果香味及良好发酵风味较淡，无异味
中 V ₃ Medium	形态不够饱满稍干瘪，果皮稍有破损	色泽稍有褐变，无光泽	果肉软塌，弹性较差，略有嚼劲	酸甜不适中，味道过甜或过酸	基本无原果香味，无异味
差 V ₄ Poor	形态不完整，干瘪皱缩，部分破损软烂	色泽暗淡，褐变严重，无光泽	果肉稀软，弹性差，无嚼劲	味道过甜或过酸且令人不愉快	无原果香味，甚至有异味

模糊数学模型的建立

评定指标集的确立：以三华李加应子组织形态（U₁）、色泽（U₂）、口感质地（U₃）、酸甜度（U₄）和风味（U₅）为评价指标，即评价指标集 U=（U₁、U₂、U₃、U₄、U₅）。评语集的确立：每个因素的评价按优 V₁、良 V₂、中 V₃、差 V₄ 四个等级评定，即评语集 V=（V₁，V₂，V₃，V₄）。评价指标权重集的确定：采用强制决定法确定各因素的权重，即权重集 X=（0.25，0.10，0.25，0.20，0.20）。

1.2.6 果肉切面扫描电镜观察 从果坯和渗糖处理后的四组样品中分别切取 5 mm × 5 mm × 3 mm 大小的切片，放入 1%戊二醛溶液中，4 ℃环境固定 24 h。使用 0.1 M 磷酸盐缓冲液（pH7.2）3 次，10 min/次，使用 1%锇酸溶液固定 2 h。使用 0.1 M 的磷酸盐缓冲液冲洗 3 次，10 min 次。使用 30%、50%、70%、80%、90%的乙醇溶液梯度脱水 1 次，100%乙醇溶液脱水 2 次，15 min/次。最后，干燥、喷金，在扫描电子显微镜下观察。

1.3 数据统计与分析

电子鼻实验进行 5 次重复，其他指标测定均进行 3 次重复，采用 Excel 2019 软件进行数据统计；采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析及 Duncan 氏法多重比较，结果以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 渗糖方式对三华李加应子总糖含量的影响

总糖含量是加应子果脯糖渍工艺的重要指标，直接影响产品的感官品质及贮藏性。从表 2 可知，在相同的渗糖（60 h）及干燥（48 h）时间条件下，真空，微波和超声波三个处理得到的加应子样品，在渗糖终点和干燥终点的总糖含量均显著高于对照传统热渗糖工艺，处理效果明显，均提高了三华李加应子的糖渍速率。不同处理组间也存在显著差异，其中微波渗糖处理在渗糖终点和干燥终点的总糖含量均为最高，其次是真空渗糖，远高于超声波渗糖；微波渗糖干燥终点总糖含量为 65.79%、真空渗糖为 63.05%，达到了产品的要求，微波渗糖和真空渗糖在提高渗糖速率方面取得显著的效果。AMARNI 等^[22]认为微波使物料内的极性分子摩擦迅速升温，加速细胞内溶剂分子蒸发，蒸发产生压力，使得细胞壁破裂，组织内部水分汽化、迁移，促使细胞间隙增大，形成无数微孔道，传质阻力显著降低，促进糖液更快地渗入。Ahmed 等^[23]认为真空产生的压力差将糖液挤压进入果体内部，填充了原先封闭在果体里面的气体区域，使传质面积增大，提高了传质速率。微波和真空渗糖在提高渗糖速率的原理有所不同。

表 2 渗糖方式对三华李加应子加工过程中总糖含量的影响

Tab. 2 Effect of sugar permeability methods on the total sugar content of candied Sanhua prunes

加工过程 Machining process	总糖含量 Total sugar content (%)			
	热渗（CK） Heat permeability	真空 Vacuum	微波 Microwave	超声波 Ultrasonic

渗糖终点	20.60±0.06 ^d	25.60±0.25 ^b	27.82±0.15 ^a	22.44±0.41 ^c
Sugar penetration end point				
干燥终点	49.56±1.22 ^d	63.05±1.33 ^b	65.79±0.36 ^a	53.49±0.18 ^c
Drying end point				

说明：同行小写字母不同表示样品间差异显著（ $P<0.05$ ），余同。

Note: Different lowercase letters in the same line indicate significant differences between samples ($P<0.05$), and the rest is the same.

2.2 渗糖方式对三华李加应子抗氧化成分含量及活性的影响

三华李含有的花色苷等抗氧化活性物质，在凉果蜜饯加工过程中会有一定的损失。不同加工方式的损失程度存在很大差异，由表 3 可知，真空渗糖处理的样品，总酚(2.69 ± 0.00 mg GAE/g)、类黄酮(5.44 ± 0.03 mg RE/g)、花色苷(4.45 ± 0.02 mg/100g)含量均显著高于其他三种渗糖方式（ $P<0.05$ ）。而微波渗糖处理的样品，上述营养成分损失严重，含量甚至显著低于对照热渗糖（ $P<0.05$ ）。超声波渗糖样品的类黄酮、总酚及花色苷含量高于微波处理，低于对照热渗糖，类黄酮差异达到显著水平（ $P<0.05$ ）。由此可见，与传统热渗糖方式相比，真空渗糖可以更好地保留住三华李加应子的抗氧化活性成分，超声波渗糖处理与对照相当，微波渗糖处理则加剧了营养素的流失。原因是真空处理降低了果体中的含氧量，减少了活性物质的氧化^[24]。酚类物质对高温较为敏感，微波处理过程中，会对物料内部进行快速加热，长时间的热效应导致营养素大量降解^[25]。冯恬^[26]在研究不同渗糖方式对苹果果脯营养的影响时，结果也表明真空渗糖可以更好地保留苹果果脯的营养。

采用 DPPH 法、ABTS 法和 FRAP 法对不同渗糖方式三华李加应子样品进行体外抗氧化活性试验。由表 3 可知，真空渗糖处理的抗氧化活性最强（ $P<0.05$ ），DPPH 自由基清除能力为 14.23 mmol TE/g，ABTS 自由基清除能力为 128.54 mmol TE/g，铁离子还原能力为 35.61 mmol Fe²⁺/g。而微波渗糖处理相比其他三种样品，表现出较弱的抗氧化活性，DPPH 自由基清除能力为 13.07 mmol TE/g，ABTS 自由基清除能力为 90.43 mmo TE/g，铁离子还原能力为 18.58 mmol Fe²⁺/g。可见，酚类含量越高的样品表现出越好的抗氧化活性，这与刘仙俊等^[27]报道的橘子抗氧化能力与总酚含量之间呈现极显著正相关的结果一致。

表 3 渗糖方式对三华李抗氧化成分含量及活性的影响

Tab. 3 Effect of sugar permeability methods on the antioxidant content and activity of candied Sanhua prunes

指标 Indicators	渗糖方式 Sugar permeability methods			
	热渗 (CK)	真空	微波	超声波
	Heat permeability	Vacuum	Microwave	Ultrasonic
营养物质含量 Nutrient content				
总酚 Total phenol (GAE mg/g)	2.27±0.11 ^b	2.69±0.00 ^a	1.94±0.05 ^c	2.16±0.10 ^{bc}
类黄酮 Flavonoids (mg RE/g)	4.37±0.36 ^b	5.44±0.03 ^a	3.21±0.02 ^d	3.80±0.01 ^c
花色苷 Anthocyanins (mg/100g)	3.38±0.003 ^b	4.45±0.02 ^a	3.30±0.02 ^c	3.33±0.02 ^{bc}
抗氧化活性 Antioxidant activity				
DPPH (mmol Trolox/g)	12.63±0.63 ^b	14.23±0.03 ^a	13.07±0.14 ^{ab}	12.55±0.17 ^b
ABTS (mmol Trolox/g)	110.61±2.9 ^b	128.54±2.9 ^a	90.43±3.74 ^c	116.59±2.98 ^{ab}

FRAP (mmol Fe ²⁺ /g)	23.46±0.19 ^c	35.61±0.5 ^a	18.58±0.42 ^d	26.48±0.41 ^b
---------------------------------	-------------------------	------------------------	-------------------------	-------------------------

2.3 渗糖方式对三华李加应子感官品质的影响

由 10 名专业食品相关行业评价员对四种不同样品的 5 项指标进行统一打分，统计分析收集汇总后的评价结果，感官评价统计结果如表 4 所示。

表 4 不同渗糖方式三华李加应子的感官评价统计结果

Tab. 4 Statistical results of sensorial evaluation of candied Sanhua prunes with different sugar permeability methods

样品 The sample	评价指标 Evaluation indicators																			
	组织形态 25% Shape				色泽 10% Colour				口感质地 25% Texture				酸甜度 20% Sweetness and sourness				风味 20% Flavor			
	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差
热渗 (CK) Heat permeability	0	3	7	0	0	5	3	2	1	7	2	0	1	5	4	0	2	4	4	0
真空 Vacuum	9	1	0	0	7	3	0	0	8	2	0	0	5	5	0	0	6	4	0	0
微波 Microwave	5	5	0	0	5	2	3	0	6	4	0	0	3	4	3	0	0	5	5	0
超声波 Ultrasonic	0	5	5	0	2	4	4	0	1	6	3	0	0	3	7	0	1	6	3	0

将上述每个样品不同评价因素各个评价等级所得票数除以总评价人数，对 10 位评价员的评价结果进行统计得到模糊关系矩阵：

$$R_{\text{热渗}} = \begin{vmatrix} 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 \end{vmatrix} \quad R_{\text{真空}} = \begin{vmatrix} 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad R_{\text{微波}} = \begin{vmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad R_{\text{超声波}} = \begin{vmatrix} 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 \end{vmatrix}$$

根据模糊数学计算原理和权重集 $X = \{0.25, 0.10, 0.25, 0.2, 0.2\}$ ，按照矩阵乘法^[28]，以热渗组样品为例，评价结果 $Y_{\text{热渗}} = X \times R = \{0.085, 0.48, 0.415, 0.02\}$ 。为使上述结果更加直观，设定优为 90 分，良为 75 分，中为 60 分，差为 45 分，即评价集 $K = \{90, 75, 60, 45\}$ ，将评价结果 Y 乘以评价集 K ，再进行求和，得模糊综合评价得分 $W_{\text{热渗}} = 0.085 \times 90 + 0.48 \times 75 + 0.415 \times 60 + 0.02 \times 45 = 69.45$ ，同理可以计算出其它三组样品的模糊综合评价得分，结果见表 5。

表 5 不同渗糖方式三华李加应子的综合评定结果

Tab. 5 Comprehensive evaluation results of candied Sanhua prunes with different sugar permeability methods

样品 The sample	评价结果集 Evaluation result set	综合评价得分 Comprehensive evaluation score
热渗 (CK) Heat permeability	{0.085, 0.48, 0.415, 0.02}	69.45

真空		
Vacuum	{0.715, 0.285, 0, 0}	85.73
微波		
Microwave	{0.385, 0.425, 0.19, 0}	77.93
超声波		
Ultrasonic	{0.065, 0.495, 0.44, 0}	69.38

感官评分表显示了不同渗糖方式对三华李加应子感官品质的影响,从表 5 感官评价结果统计表可以看出,在组织形态及口感质地方面:真空渗糖及微波渗糖表现较好,由于渗糖速率较快,糖分可以迅速到达李果内部,使得加应子产品饱满光滑,富有嚼劲。在色泽方面,真空渗糖减少果体与氧气接触,有效防止褐变,使产品丰润均匀,透明度佳。在风味方面,真空渗糖较好地保留了三华李原果香味及具有良好发酵风味。四种渗糖方式感官品质得分从高到低依次为:真空渗糖>微波渗糖>热渗糖>超声波渗糖。其中热渗糖和超声波渗糖两组样品在感官品质上较为接近,真空渗糖感官品质得分最高为 85.73。

2.4 渗糖方式对三华李加应子香气成分的影响

由表 6 可以看出,在 10 个传感器中,不同渗糖方式样品间响应值差异较明显的主要体现在传感器 W5S、W2S 上,样品间响应值最大差距分别达到 29.31, 11.95, 其他传感器样品间响应值差距均在 0~5 之间,说明渗糖方式对三华李加应子的氮氧化合物、醇和醛酮类风味物质有较大影响。已有的研究表明三华李的特征风味物质主要为醇类、醛类、酮类及酯类^[13],表 6 显示,真空渗糖样品对传感器 W2S(对醇类及醛酮类灵敏)的响应值最高、微波渗糖最低、超声与对照差异不显著($P>0.05$),说明真空渗糖能更好地保留三华李特征风味,该结果与表 4 中风味评价结果相符。这与李兴武等^[10]研究渗糖方式对脆红李果脯香气的影响结论一致。真空渗糖能降低果肉组织中的含氧量,有利于减少原果特征风味成分的氧化,而微波渗糖由于长时间的热效应导致风味成分挥发及降解。

表 6 不同渗糖方式三华李加应子的电子鼻传感器响应值

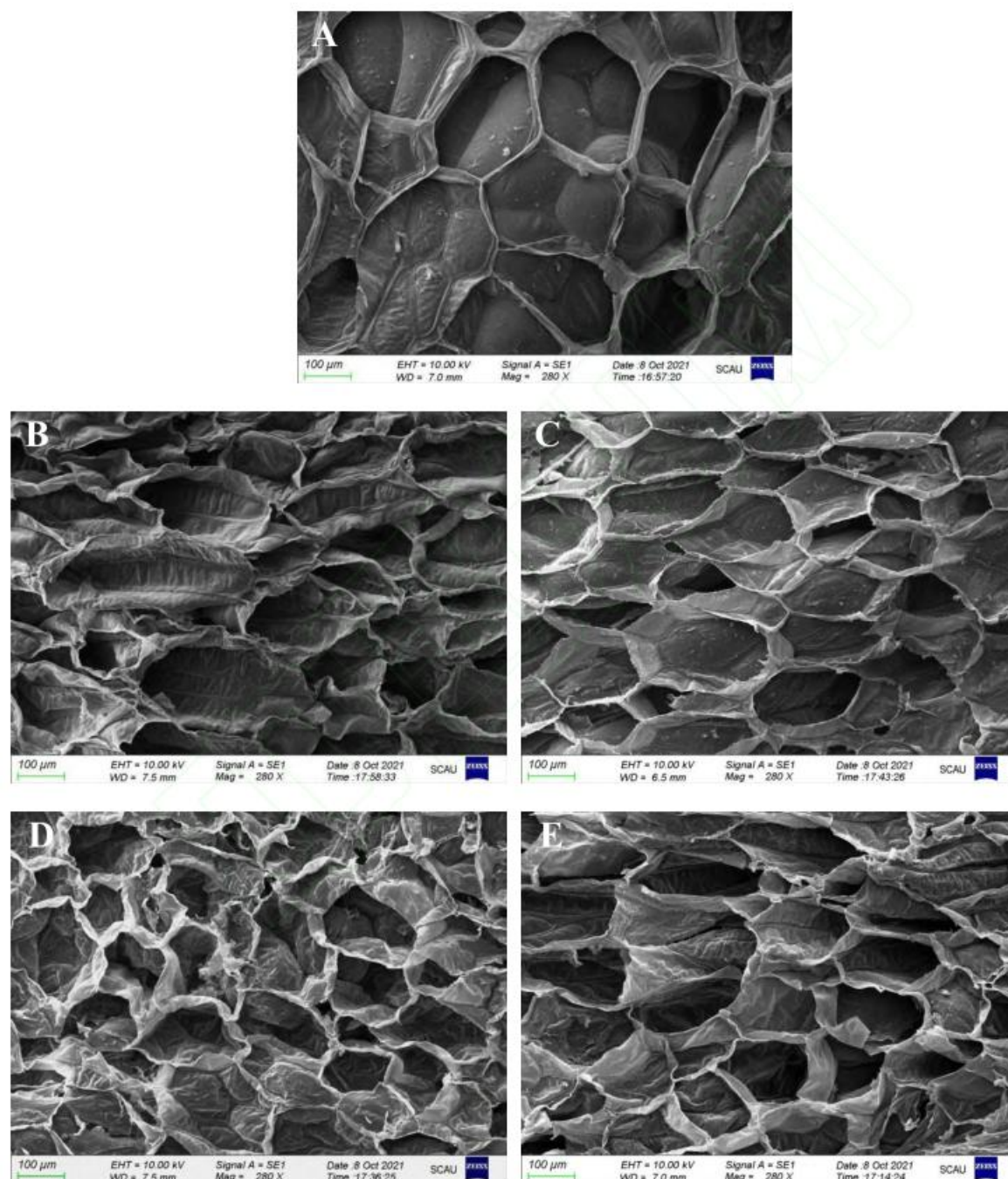
Tab. 6 Response value of electronic nose sensor of candied Sanhua prunes with different sugar permeability methods

传感器	性能描述	热渗 (CK)	真空	微波	超声波
The sensor	Performance description	Heat permeability	Vacuum	Microwave	Ultrasonic
W5S	对氮氧化合物很灵敏	85.31±2.18 ^a	78.30±1.06 ^b	56.00±0.46 ^d	69.31±0.23 ^c
W1W	对硫化物灵敏	65.56±0.63 ^a	62.20±0.72 ^b	66.16±0.14 ^a	61.94±0.02 ^b
W2S	对醇类, 醛酮类灵敏	25.73±0.80 ^b	29.65±0.32 ^a	17.70±0.11 ^c	24.75±0.17 ^b
W2W	对有机硫化物灵敏	23.26±0.03 ^b	21.39±0.58 ^c	25.98±0.06 ^a	22.28±0.06 ^{bc}
W1S	对甲基类灵敏	9.33±0.14 ^a	9.47±0.13 ^a	9.47±0.03 ^a	8.40±0.02 ^b
W6S	主要对氢化物有选择性	2.45±0.04 ^a	2.26±0.02 ^b	1.95±0.00 ^c	2.21±0.00 ^b
W3S	对长链烷烃灵敏	2.58±0.00 ^a	2.44±0.07 ^b	2.33±0.01 ^b	2.41±0.00 ^b
W3C	芳香成分灵敏, 氨类	1.05±0.03 ^a	1.03±0.01 ^a	1.08±0.01 ^a	1.02±0.01 ^a
W5C	短链烷烃芳香成分	0.13±0.01 ^c	0.13±0.00 ^c	0.18±0.00 ^a	0.15±0.00 ^b
W1C	芳烃成分, 苯类灵敏	0.12±0.00 ^b	0.14±0.00 ^a	0.12±0.00 ^b	0.15±0.00 ^a

2.5 渗糖方式对三华李果肉微观结构的影响

SEM 对三华李果肉微观结构的表征如图 2 所示。从图 2 可以看到,三华李果坯(A)的果肉细胞呈圆形或椭圆形,形态饱满且排列紧密,果肉组织呈蜂窝状。经渗糖处理后果肉细胞都发生了不同程度的变形。经热渗糖处理后(B)样品的果肉细胞壁卷曲皱缩,细胞排列变得不整齐,网状结构消失。超声波(E)与热渗糖处理(B)二者在果肉组织结构上差异较小。这与两者在表 4 感官评价中组织形态及口感质地的指标得分结果相一致。经真空渗糖样品(C)相比其他三种渗糖处理,果肉细胞形

态较饱满清晰，细胞排列较整齐。这与表 4 感官评价中，真空渗糖样品得分最高，形态完整饱满，色泽丰润均匀，口感软硬适中，果肉厚实富有嚼劲及弹性的结果相符。同时，真空处理对细胞结构的破坏较小，有利于减少营养成分流失。经微波渗糖样品（D），果肉细胞破坏严重，细胞壁结构破损，细胞内溶质流出，细胞皱缩、排列分散疏松，间隙变大，传质速率增大，总糖含量显著提高（ $P<0.05$ ），因此微波渗糖在表 4 感官评价结果中，样品形态饱满程度及口感质地优于对照热渗糖。但细胞溶质的大量流失及微波导致的高温也导致营养物质损失严重，微波渗糖样品的酚类物质含量最低，抗氧化活性最弱，与 2.1 及 2.2 的实验结果相符。



注：(A) 果坯；(B) 热渗；(C) 真空；(D) 微波；(E) 超声波

Note: (A) Fruit billet; (B) Heat permeability; (C) Vacuum; (D) Microwave; (E) Ultrasonic

图 2 三华李果肉组织切面 SEM 图像

Fig. 2 SEM image of sanhua Plum pulp tissue section

3 结论

本文对比了热渗糖、真空渗糖、微波渗糖和超声波渗糖四种方式对三华李加应子渗糖速率、活性成分含量、抗氧化活性、香气品质以及果肉细胞结构的影响,结果表明相同渗糖和干燥时间条件下,微波渗糖在渗糖终点和干燥终点,其总糖含量均最高,表明微波渗糖速率最高,但实验也显示微波渗糖的活性成分损失最大,抗氧化活性最弱;真空渗糖的渗糖速率低于微波,高于传统热渗糖和超声波渗糖,其活性成分含量在四中渗糖方式中最高(总酚 2.69 mg GAE/g、类黄酮 5.44 mg RE/g、花色苷 4.45 mg/100g),抗氧化活性最强,感官综合评分最高为 85.73。与热渗糖相比,超声波渗糖速率小幅提高了 7.93% (干燥终点总糖含量 53.49%),但在活性成分含量、抗氧化活性及感官品质方面,两者之间差异不显著($P>0.05$)。电子鼻检测结果表明,真空渗糖能保留更多的三华李原果香气成分,而微波渗糖香气成分损失最大,这与感官评价中风味指标得分相符。真空渗糖对三华李果肉组织的破坏程度最弱,微波渗糖破坏最严重,热渗糖与超声波渗糖居中,二者间差别不大。综上,采用真空渗糖加工三华李加应子,产品营养及感官品质佳、渗糖速率高,在生产上有良好的应用前景。本试验未考虑多种渗糖方式联合处理,可能会有更好的渗糖效果,有待进一步探索。

参考文献

- [1] 李依娜,邹颖,余元善,肖更生,徐玉娟,邹波.不同酚酸对三华李清汁贮藏期间色泽稳定性的比较分析[J].现代食品科技,2020,36(7):165-172+16.
LI Y N, ZOU Y, YU Y S, XIAO G S, XU Y J, ZOU B. Comparative analysis of color stability of different phenolic acids on sanhua li qing juice during storage [J]. Modern food science and technology, 2020, 36(7): 165-172+16.
- [2] 李媛,郭卓钊,郭美媛,郭子恒,黄苇.三华李与蓝莓花色苷抗氧化活性及抑制 α -淀粉酶活性比较研究[J].轻工科技, 2020, 36(6):20-23.
LI Y, GUO Z Z, GUO M Y, GUO Z H, HUANG W. Comparative study on antioxidant activity and inhibition of α -amylase activity of anthocyanins in Prunus sanhua and Blueberry [J]. Light industry science and technology, 2020, 36(6): 20-23.
- [3] 林菱,徐玉娟,唐道邦,吴继军,陈于隄,张岩.3 种干燥方式对糖渍加应子品质的影响[J].食品科学,2013,34(21):83-86.
LIIN X, XU Y J, TANG D B, WU J J, CHEN Y L, ZHANG Y. Effects of three drying methods on the Quality of Sugar Candied Fruit [J]. Food science, 2013, 34(21): 83-86.
- [4] 马菲菲,胡昕,王瀚墨,普绍东,杨延昌,李宏.李子果脯制备工艺优化研究[J].食品安全质量检测学报,2020,11(12):3873-3879.
MA F F, HU X, WANG H M, PU S D, YANG Y C, LI H. Study on the optimization of the preparation process of plum preserves[J]. Journal of food safety and quality, 2020, 11(12): 3873-3879.
- [5] 赵文红,肖燕清,白卫东,原家乐.改善常压渗糖白果果脯品质的工艺研究[J].食品科技,2010,35(3):104-107.
ZHAO W H, XIAO Y Q, BAI W D, YUAN J L. Study on the technology of improving the quality of preserved ginkgo fruit with saccharification under atmospheric pressure [J]. Food science and technology, 2010, 35(3): 104-107.
- [6] 崔书成,项方献,卢红霞.糖渍工艺对加应子返砂现象的影响及其优化[J].浙江农业科学, 2018, 59(7): 1267-1268, 1273.
CUI S C, XIANG F X, LU H X. The influence of sugar pickling process on the phenomenon of sand return and its optimization[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(7): 1267-1268, 1273.
- [7] 冯媛媛,李雪丹,桑亚新,刘晶,武瑞霞,孙文菊.微波渗糖技术加工低糖欧李果脯[J].食品科技,2015,40(7):103-109.
FENG Y Y, LI X D, SANG Y X, LIU J, WU R X, SUN W G. Processing low-sugar candied plums with microwave infiltration technology[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(7): 103-109.
- [8] 孙丽婷,刘立增,刘爱国,王伟佳,马江,杨毅.不同渗糖方式对红宝石李果脯品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(1):180-185.
SUN L T, LIU L Z, LIU A G, WANG W J, MA J, YANG Y. The effect of different sugar penetration methods on the quality of ruby plum preserved fruit[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(1): 180-185.

- [9] 应苗苗,应铁进,罗自生.真空渗糖技术对李品质的影响[J].浙江农业学报,2008(2):127-130.
YING M M, Y T J, LUO Z S. Effects of vacuum sugar osmosis on quality of Plum [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2008(2): 127-130.
- [10] 李兴武,章黎黎.渗糖方式对脆红李果脯品质及香气的影响[J].食品研究与开发,2017,38(21):79-84.
LI X W, ZHANG L L. The effect of sugar infiltration methods on the quality and aroma of crisp red plums[J]. Food Research and Development, 2017, 38(21): 79-84.
- [11] 黄凯信,梁凤,许剑华,周爱梅.双华李微波渗糖工艺研究[J].农产品加工,2019(15):49-52.
HUANG K X, LIANG F, XU J H, ZHOU A M. Study on microwave osmosis of sugar from *Prunus chinensis* [J]. Agricultural Products Processing, 2019(15): 49-52.
- [12] 李明娟,游向荣,张雅媛,卫萍,王颖,周葵,范志毅,邓凤莹.不同渗糖技术对龙滩珍珠李果脯品质及果实细胞结构的比较[J].热带作物学报,2019,40(8):1653-1659.
LI M J, YOU X R, ZHANG Y Y, WEI P, WANG Y, ZHOU K, FAN Z Y, DENG F Y. Comparison of Longtan Pearl Plum Preserved Quality and Fruit Cell Structure with Different Sugar Infiltration Techniques[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(8): 1653-1659.
- [13] 李媛. 基于发酵法的高花色苷三华李果坯保藏工艺研究[D].华南农业大学,2017.
LI Y. Preservation technology of plum fruit with high anthocyanins based on fermentation method [D]. South China Agricultural University, 2017.
- [14] 宋倩. 双华李脱硫工艺研究及其清咽功能凉果的研发[D]. 华南农业大学, 2016.
SONG Q. Study on the desulfurization process of Shuanghua plum and research and development of liangguo fruit with clear pharyngeal function [D]. South China Agricultural University, 2016.
- [15] 吴晓青,陈丹,邱红鑫,于丽丽.芙蓉李中总多酚含量测定方法的优选[J].中国中医药科技,2011,18(2):131-133.
WU X Q, CHEN D, QIU H X, YU L L. Optimal determination of total polyphenol content in Furong plum [J]. China Traditional Chinese Medicine Science and Technology, 2011, 18(2): 131-133.
- [16] 白生文,汤超,田京,闫宏斐,许晓莎,范惠玲.沙棘果渣总黄酮提取工艺及抗氧化活性分析[J].食品科学,2015,36(10):59-64.
BAI W S, TANG C, TIAN J, YAN H F, XU X S, FAN H L. Extraction technology of total flavonoids from seabuckthorn pomace and analysis of antioxidant activity[J]. Food Science, 2015, 36(10): 59-64.
- [17] 雷良波,周剑丽,黄叶强,赵海钧,赵漫漫,陈军李.蓝莓果渣花色苷提取工艺优化及抗氧化活性比较研究[J].食品工业科技,2018,39(21):178-184.
LEI L B, ZHOU J L, HUANG Y Q, ZHAO H J, ZHAO M M, CHEN J L. Optimization of blueberry pomace anthocyanin extraction process and comparative study on antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(21): 178-184.
- [18] SOKOL-LETOWSKA A, KUCHARSKA A Z, WINSKA K, SZUMNY A, NAWIRSKA-OLSZANSKA A, MIZGIER P, WYSPIANSKA D. Composition and antioxidant activity of red fruit liqueurs[J]. Food Chemistry, 2014, 157C(AUG.15): 533-539.
- [19] 何礼,陈克玲,何建,关斌,李洪雯,王建辉,刘建军.低温贮藏下塔罗科血橙抗氧化性能研究[J].西南农业学报,2015,28(6):2666-2671.
HE L, CHEN K L, HE J, GUAN B, LI H W, WANG J H, LIU J J. Antioxidant properties of Taroko blood orange under low temperature storage[J]. Southwest Agricultural Journal, 2015, 28(6): 2666-2671 .
- [20] 陈浩南,李姣,王婉愉,张晓峰,樊剑鸣.高良姜水提物的体外抗氧化和胰脂肪酶、 α -葡萄糖苷酶抑制功能研究[J].中国调味品,2019,44(4):43-47+51.
CHEN H N, LI J, WANG W Y, ZHANG X F, FAN J M. In vitro anti-oxidation, pancreatic lipase and α -glucosidase inhibitory functions of galangal extracts[J]. Chinese Condiments, 2019, 44(4): 43-47+51.
- [21] 崔立柱,付依依,刘士伟,王永霞,谭志超,段盛林.基于模糊数学感官评价法沙棘饼干烘焙工艺优化[J].食品工业科技,2021,42(15):163-169.

- CUI L Z, FU Y Y, LIU S W, WANG Y X, TAN Z C, DUAN S L. Optimization of sea-buckthorn biscuit baking process based on fuzzy mathematical sensory evaluation[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(15): 163-169.
- [22] AMARNI F, KADI H. Kinetics study of microwave-assisted solvent extraction of oil from olive cake using hexane : Comparison with the conventional extraction[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(2): 322-327.
- [23] AHMED I, QAZI I M, JAMAL S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables[J]. Innovative Food ence & Emerging Technologies, 2016: 29-43.
- [24] 宋璐瑶,刘东红. 芒果片真空预处理联合超声辅助渗透脱水的传质动力学及品质分析[J]. 现代食品科技, : 1-8.
SONG L Y, LIU D H. Mass transfer kinetics and quality analysis of vacuum pretreatment combined with ultrasonic assisted osmotic dehydration of mango slices [J]. Modern Food Science and Technology: 1-8.
- [25] ZHENG X Z , WANG X , LAN Y B , SHI J , XUE S J , LIU C H . Application of response surface methodology to optimize microwave-assisted extraction of silymarin from milk thistle seeds[J]. Separation & Purification Technology, 2010, 70(1):34-40.
- [26] 冯恬. 苹果新品种‘美红’制备低糖高类黄酮果脯的适用性研究[D]. 2020.
FENG T. Study on the applicability of the new apple variety 'Meihong' in preparing low-sugar and high-flavonoid preserved fruit[D]. 2020.
- [27] 刘仙俊,李文华,孙红艳,尤金美,张红阳,张天宇,郝春燕,卫乐.橘子不同部位活性成分含量及其体外抗氧化能力研究 [J].食品研究与开发,2021,42(17):13-18.
LIU X J, LI W H, SUN H Y, YOU J M, ZHANG H Y, ZHANG T T, HAO C Y, WEI L. The content of active ingredients in different parts of oranges and their in vitro antioxidant capacity[J]. Food Research and Development, 2021, 42(17): 13-18.
- [28] 乐梨庆,万燕,向达兵,赵钢,欧阳建勇,马成瑞,孙露,魏威,徐欣然.藜麦酥性饼干的加工工艺研究[J].粮食与饲料工业,2019(7):21-25.
LE L Q, WAN Y, XIANG D B, ZHAO G, OUYANG J Y, MA C R, SUN L, WEI W, XU X R. Research on the processing technology of quinoa crisp biscuit[J]. Food and Feed Industry, 2019(7): 21-25.